



**Estimativa de Profundidade do Estuário do Rio Poxim – SE
com Dados do Sensor TM Landsat 05**
Depth Estimate of the Poxim – SE Estuary
With TM Sensor Data Landsat 05

Cassio Filipe Vieira Martins¹; Darlan Teles da Silva²; André Quintão de Almeida¹;
Maria Isidória Silva Gonzaga¹; Rodolfo Souza³ & Jorge Antônio Vieira Gonçalves²

¹Universidade Federal de Sergipe, Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos,
Av. Marechal Rondon s/n, 49100-000, Jardim Rosa Elze, São Cristóvão, SE, Brasil

²Universidade Federal de Sergipe, Departamento de Engenharia Agrícola, Av. Marechal
Rondon s/n, 49100-000, Jardim Rosa Elze, São Cristóvão, SE, Brasil

³Texas A&M University, Department of Biological and Agricultural Engineering, College Station, Texas, USA
E-mails: filipe_geol@hotmail.com; darlan.teles@hotmail.com; andreqa@gmail.com;
mariaisilva@gmail.com; rodolfo.souza@tam.u.edu; javgdbg@gmail.com

Recebido em: 01/12/2018 Aprovado em: 01/07/2019

DOI: http://dx.doi.org/10.11137/2020_4_111_118

Resumo

A batimetria de um corpo d'água normalmente é estimada através de levantamentos batimétricos. Apesar de ser um método muito utilizado, os levantamentos batimétricos demandam tempo e diversos equipamentos, tornando-o oneroso e passível de erros. O objetivo principal deste estudo foi estimar a batimetria do estuário do rio Poxim a partir de técnicas de Sensoriamento Remoto e análises estatísticas de regressão. O trabalho foi realizado no estuário do rio Poxim, localizado na bacia hidrográfica do Rio Sergipe, na cidade de Aracaju - SE. Foram ajustados modelos de regressão entre os valores batimétricos e as bandas espectrais do satélite Landsat 5 TM e o índice da diferença normalizada da água. A avaliação dos modelos ajustados foi realizada pela análise de significância dos coeficientes, do coeficiente de determinação (r^2), da raiz do erro quadrado médio (REQM) e da validação cruzada. A melhor correlação foi observada entre os valores de batimetria e a banda espectral do comprimento de onda do infravermelho próximo, com valor de 0,71. O melhor ajuste foi encontrado com a utilização do modelo linear, com r^2 igual a 0,6 e REQM de 33% (0,46 metros) na etapa de calibração e r^2 igual 0,53 e REQM de 0,51 metros (37%) na validação. Pode-se concluir que o modelo de batimetria, ajustado a partir de dados de Sensoriamento Remoto, pode ser utilizado para estimar de forma satisfatória os valores de batimetria do estuário do rio Poxim.

Palavras-chave: Batimetria; ecobatímetro; sensoriamento remoto

Abstract

The bathymetry of a water body can be measured in the field. Even though it is a widely used method, it is time consuming and requires various equipment, which makes it costly and prone to error. The main objective of this study was to estimate the bathymetry of the Poxim River estuary using Remote Sensing techniques and statistical regression analysis. The work was carried out in the Poxim river estuary, located in the Sergipe River basin, in the city of Aracaju - SE. Regression models were fitted between the bathymetric values and the spectral bands of the Landsat 5 TM satellite and the normalized water difference index. The evaluation of the adjusted models was performed by the analysis of significance of coefficients, coefficient of determination (r^2), root mean square error (RMSE) and cross validation. The best correlation was observed between the values of bathymetry and the spectral band of the near infrared wavelength, with a value of 0.71. The best result was found using the linear model, with coefficient of determination equal to 0.6 and RMSE of 33% (0.46 meters). Therefore, the bathymetry model, adjusted from Remote Sensing data, was able to satisfactorily estimate the bathymetry values of the Poxim River estuary.

Keywords: Bathymetry; ecometer; remote sensing

1 Introdução

Os estuários apresentam características particularmente favoráveis à fixação de cidades e ao desenvolvimento de atividades econômicas. Tradicionalmente aproveitados como portos naturais ou como vias de comunicação, geralmente com boas condições para a agricultura e para a exploração dos recursos vivos, os estuários têm sido ocupados por extensas áreas industriais e urbanas (Mclusky, 1989). Neste ambiente é possível identificar importante berçário ou refúgio de diversos organismos, como peixes, moluscos, crustáceos, aves, dentre outros. Atualmente, cerca de dois terços da população mundial vivem em áreas situadas a menos de 100 km da linha de costa (ONU, 2017), o que torna o ambiente estuarino local ideal para monitoramento das ações antropogênicas (Scott *et al.*, 2005).

No Brasil e no estado de Sergipe, esta realidade não é diferente, a capital Sergipana está inserida em dois grandes estuários, o do rio Sergipe e o do rio Poxim. O estuário do rio Poxim constitui um exemplo de frequente conflito entre ambiente e desenvolvimento. Nas suas margens situa-se a região da Grande Aracaju, com cerca de 900 mil habitantes, um conjunto de unidades industriais e importantes infraestruturas urbanas. O estuário do Poxim abrange também áreas de reconhecida importância ecológica para o ecossistema marinho, como o manguezal. Tradicionalmente, o levantamento batimétrico vem sendo utilizado como ferramenta de grande importância na gestão e monitoramento ambiental em estuários. Para aquisição dos dados batimétricos, normalmente, são necessários equipamentos denominados ecobatímetros, ou sondas batimétricas. Embora bastante utilizado no monitoramento de recursos hídricos, o levantamento batimétrico possui longo período para aquisição e tratamento dos dados, além de seu custo elevado e amostragem pontual. Determinados estudos demonstram algumas dificuldades enfrentadas no processo tradicional de levantamento batimétrico, quanto ao tempo gasto para aquisição e tratamento de informações (Krug & Noernberg, 2006; Frazão & Amaro, 2016).

Atualmente, dados de Sensoriamento Remoto (SR) orbital e dados LiDAR vêm sendo utilizadas para estimar os valores de profundidade de diferentes tipos de ambientes aquáticos. Namikawa (2015) a partir de dados do satélite Landsat 8 obteve um erro médio de 2% na estimativa da batimetria do reservatório do Jaguari-Jacareí, sistema Cantareira-SP. Lima *et al.* (2013), estimaram com boa precisão a batimetria do açude do Saco-PE a partir de dados orbitais do satélite Landsat 5. Além da maior rapidez na aquisição dos dados, estas técnicas ainda possuem baixo custo de aquisição, assim como possibilita a geração de informações periódicas e contínuas nas frequências do tempo e espaço (Legleiter *et al.*, 2014).

Diante do exposto acima, o objetivo principal deste trabalho foi ajustar modelos empíricos de regressão para estimar valores de batimetria no estuário do rio Poxim-SE a partir de dados orbitais do Satélite Landsat 5 TM.

2 Material e Métodos

2.1 Área de Estudo

O trabalho foi realizado na região do estuário do rio Poxim. A área está localizada em meio à região metropolitana do município de Aracaju, estado de Sergipe, nordeste Brasileiro (Figura 1). O estuário do rio Poxim ocupa uma área de aproximadamente 1,87 km².

2.2 Levantamento Batimétrico

Os valores de batimetria foram levantados na data de 19 de novembro de 2010, através do uso de uma embarcação náutica motorizada, equipada com Sonar EAGLE CUDA 300, com 200 kHz de frequência, capacidade de penetração do sonar de 180 metros, alta resolução com angulação de 60° a uma velocidade de 70 mph (ou 31 metros por segundo) e GPS Garmin CS60X. A embarcação utilizada foi um barco de pequeno porte motorizado.

O levantamento de dados se iniciou duas horas antes do mínimo da vazante da maré e terminou duas horas após o início da preamar, com ajuste dos dados a partir da tábua de maré disponibilizada pela Marinha do Brasil para o dia e horário do levantamento batimétrico.

Neste trabalho foram utilizados 147 pontos distribuídos em sete seções distantes entre si em aproximadamente 200 m (Figura 1). Dos 147 pontos amostrais, estes foram reduzidos para 43 pontos, uma vez que dois ou mais pontos batimétricos incidiram no mesmo pixel (30 x 30 metros) da imagem de satélite. Quando dois ou mais valores de batimetria caíram dentro do mesmo pixel, os mesmos foram reduzidos a apenas um valor de batimetria através de sua média.

2.3 Dados Orbitais

Foi utilizada uma imagem Landsat 05 obtida pelo sensor Thematic Mapper (TM) na data de 15 de outubro de 2010, às 12 horas e 26 minutos (a primeira preamar do dia ocorreu às 11 h:15 m:00 s). O trabalho buscou coincidir com maior precisão o dia e horário de aquisição de dados entre a imagem de satélite e as informações de campo. Os valores de batimetria coletados em novembro de 2019 foram ajustados para a altura da tábua de maré do mesmo dia e horário do registro da imagem (12:26 do dia 15/10/2010).

Estimativa de Profundidade do Estuário do Rio Poxim – SE com Dados do Sensor TM Landsat 05

Cassio Filipe Vieira Martins; Darlan Teles da Silva; André Quintão de Almeida;
Maria Isidória Silva Gonzaga; Rodolfo Souza & Jorge Antônio Vieira Gonçalves

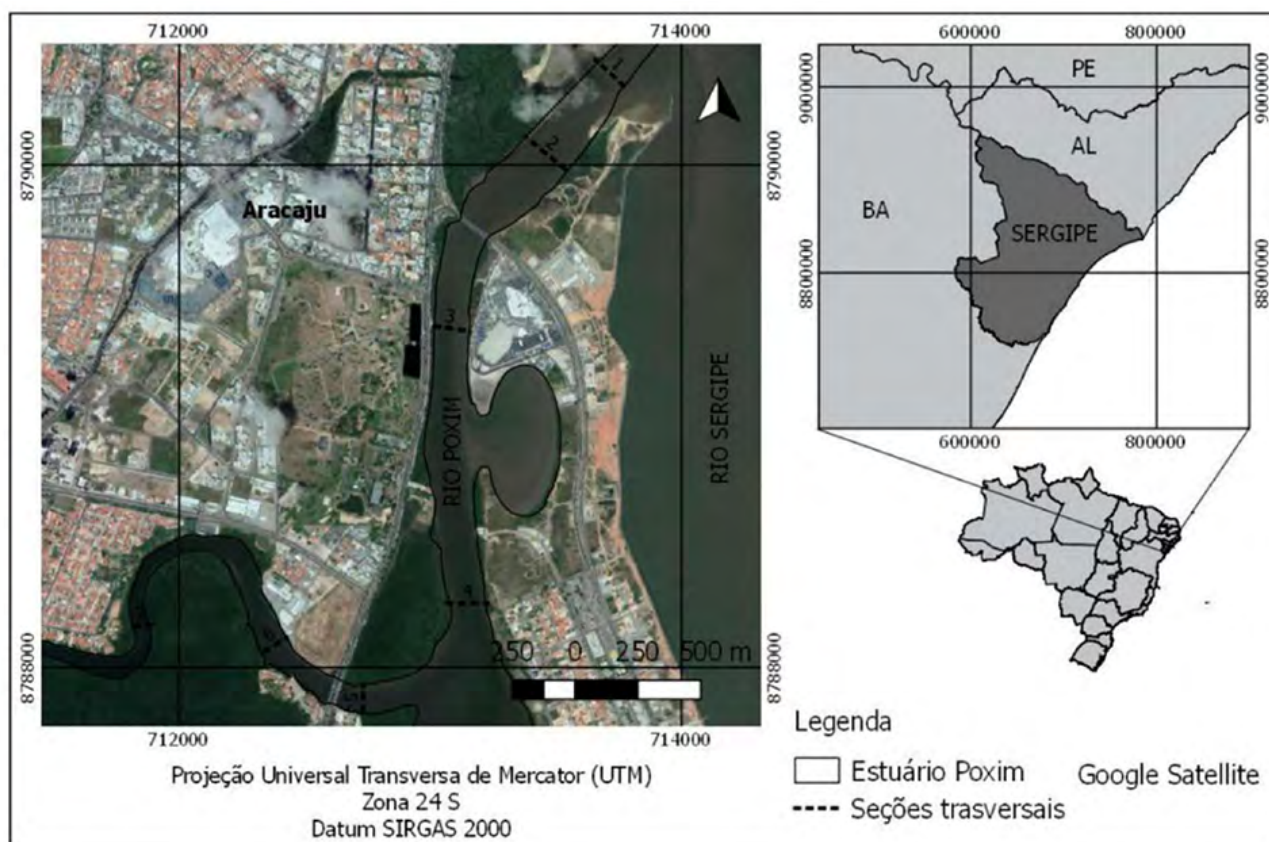


Figura 1 Localização da área de estudo, estuário do rio Poxim, com destaque para as sete seções transversais de levantamento batimétrico.

O registro da imagem Landsat 05 foi realizado com um ângulo de elevação do sol de $58,73^\circ$, azimute de $73,17^\circ$, e ponto e órbita de passagem números 67 e 215, respectivamente. Foram utilizadas cinco bandas espectrais do sensor TM, todas com resolução espacial de 30 metros. Sendo a Banda 1 a da região azul do espectro eletromagnético (B1), $0,45$ a $0,52 \mu\text{m}$; a banda verde (B2), de $0,52$ a $0,60 \mu\text{m}$; a banda vermelha (B3), de $0,63$ a $0,69 \mu\text{m}$; a banda do infravermelho próximo (B4), de $0,76$ a $0,90 \mu\text{m}$; e a banda do infravermelho médio (B5), de $1,55$ a $1,75 \mu\text{m}$.

Na fase de pré-processamento, as bandas espectrais foram georreferenciadas por meio de interpolador de primeiro grau de alocação de vizinho mais próximo. Dez pontos de controle foram extraídos de uma imagem RapidEye georreferenciada da mesma área de estudo. A projeção final foi UTM/WGS84, zona 24 Sul, a mesma utilizada no levantamento de dados batimétrico. O erro quadrático médio encontrado na fase de georreferenciamento foi inferior a um (1) metro. Para cada banda espectral, foi realizada a correção atmosférica, em que os níveis digitais foram convertidos em radiância espectral, a partir do modelo “Dark Object Subtraction” (DOS) (Vermote *et al.*, 1997), e, posteriormente, convertidos em reflectância (ρ). Os

parâmetros de entrada no modelo DOS foram: modelo de atmosfera tropical, modelo continental de aerossóis e visibilidade horizontal de 25 km. As fases de pré e pós-processamento das imagens, assim como a geração dos mapas, foram realizadas com o auxílio de um Sistema de Informações Geográficas (SIGs) através do software Qgis.

2.4 Variáveis Explicativas

Além das bandas originais do sensor TM, foi estimado o Índice de Diferença Normalizada da Água (NDWI), estimado pela Equação: $\text{NDWI} = (B2 - B4) / (B2 + B4)$. Em que, B2 e B4 são as bandas da região do verde e do infra-vermelho, respectivamente.

Além do NDWI, foram estimadas todas as possíveis relações de razão entre as bandas, ou seja, $B1 B2^{-1}$, $B1 B3^{-1}$, $B1 B4^{-1}$, $B1 B5^{-1}$, $B2 B3^{-1}$, $B2 B4^{-1}$, $B2 B5^{-1}$, $B3 B4^{-1}$, $B3 B5^{-1}$ e $B4 B5^{-1}$.

Os valores das bandas espectrais e do NDWI foram associados às características médias dos 43 pontos de batimetria. A associação foi feita com as coordenadas coletadas em campo no levantamento batimétrico, com GPS e os respectivos valores de coordenadas na imagem.

2.5 Ajuste dos Modelos Empíricos

Os modelos de estimativas de regressão foram ajustados a partir da análise de correlação entre os valores médios de batimetria (43 pontos) estimados em campo e os valores das bandas espectrais, do NDWI e das razões de bandas.

A seleção de modelos de regressão linear múltipla foi realizada a partir do ajuste de todos os possíveis modelos e escolha daqueles que apresentaram o menor critério bayesiano de informação (CBI) e o maior coeficiente de determinação (r^2) e menor Raiz do Erro Quadrático Médio (REQM). Os modelos selecionados foram avaliados com uso do teste t de Student a 5% de probabilidade. Em adição foi conduzida análise de resíduos para avaliar a existência de tendência no erro, assim como da correlação entre variáveis explicativas do modelo (multicolinearidade). A análise da normalidade, homogeneidade e independência dos resíduos foi realizada pelos gráficos do resíduo e pelo teste Shapiro Wilk.

O poder de predição dos modelos ajustados foi avaliado a partir da técnica de validação cruzada, com base no coeficiente de determinação e REQM. Do conjunto de todas as observações médias (total = 43), 20% foram utilizadas para uma validação independente do modelo selecionado. Ou seja, foi escolhido aleatoriamente 1000 diferentes combinações de 20% dos dados e as estatísticas r^2 e REQM foram estimadas. Ao final do processo, 1000 repetições, os valores médios de r^2 e REQM foram determinados. Para avaliar o nível de acerto do melhor modelo ajustado nas diferentes classes de profundidade do estuário, os valores de batimetria coletados em loco foram divididos em percentis (0-25%, 25-50%, 50-75% e 75-100%) e os valores de r^2 e REQM foram estimados. O processamento dos dados, toda análise gráfica e estatística foi realizada no software R 3.1.0 (R Development Core Team, 2014).

Ao final, de posse do melhor modelo e das bandas das imagens do satélite Landsat 05, os valores de batimetria foram estimados para todo o estuário do rio Poxim com o auxílio do SIG Qgis.

3 Resultados

Na Tabela 1, é apresentado a estatística descritiva dos valores de batimetria estimados no estuário do rio Poxim-SE. Conforme pode ser observado na Tabela, os valores batimétricos ao longo do estuário do rio Poxim demonstram baixa variação. O estuário apresenta uma profundidade média de 1,35 metros e amplitude batimétrica que pode chegar a 2,95 m, com mínima de 0,05 m e máxima de 3,00 m. A faixa situada entre 1,0 m e 1,5 m é a que possui maior frequência ocorrência, com poucos valores de batimetria acima de 2,5 m de profundidade.

Na Figura 2 é possível observar os resultados de correlação entre a variável batimetria (BAT) e as bandas (B) espectrais do sensor TM do satélite Landsat 05, além do NDWI.

O melhor modelo de regressão ajustado, com três variáveis explicativas, teve como coeficiente de determinação o valor de 0,60, um valor de BIC igual a -21 e REQM de 0,46 metros (33%), com Equação: $BAT = 3,506 - 12,061(B4) + 5,33(B2 \setminus B4) - 7,081(B3/B4)$.

Todos os coeficientes estimados foram significativos ao teste t ao nível de 5%. A validação cruzada do modelo apresentou um bom desempenho, com valores de $r^2 = 0,53$ e REQM igual a 0,51 metros (37%). A análise gráfica dos resíduos (Figura 3A e 3B) e o teste de Shapiro Wilk (valor de $p = 0,42$) mostrou que o resíduo é normalmente distribuído, atendendo assim os pressupostos do ajuste de um modelo de regressão.

Na Tabela 2 são apresentados os valores de coeficiente de determinação e o erros de estimativa da batimetria, considerando quatro diferentes classes de profundidade.

Estatística	Valor
Média	1,35
Mínimo	0,05
Máximo	3,00
Erro padrão	0,12
Mediana	1,32
Desvio padrão	0,75
Variância	0,56
Curtose	-0,74
Assimetria	0,01

Tabela 1 Estatística descritiva dos valores de batimetria estimados no estuário do rio Poxim-SE.

Estimativa de Profundidade do Estuário do Rio Poxim – SE com Dados do Sensor TM Landsat 05

Cassio Filipe Vieira Martins; Darlan Teles da Silva; André Quintão de Almeida;

Maria Isidória Silva Gonzaga; Rodolfo Souza & Jorge Antônio Vieira Gonçalves

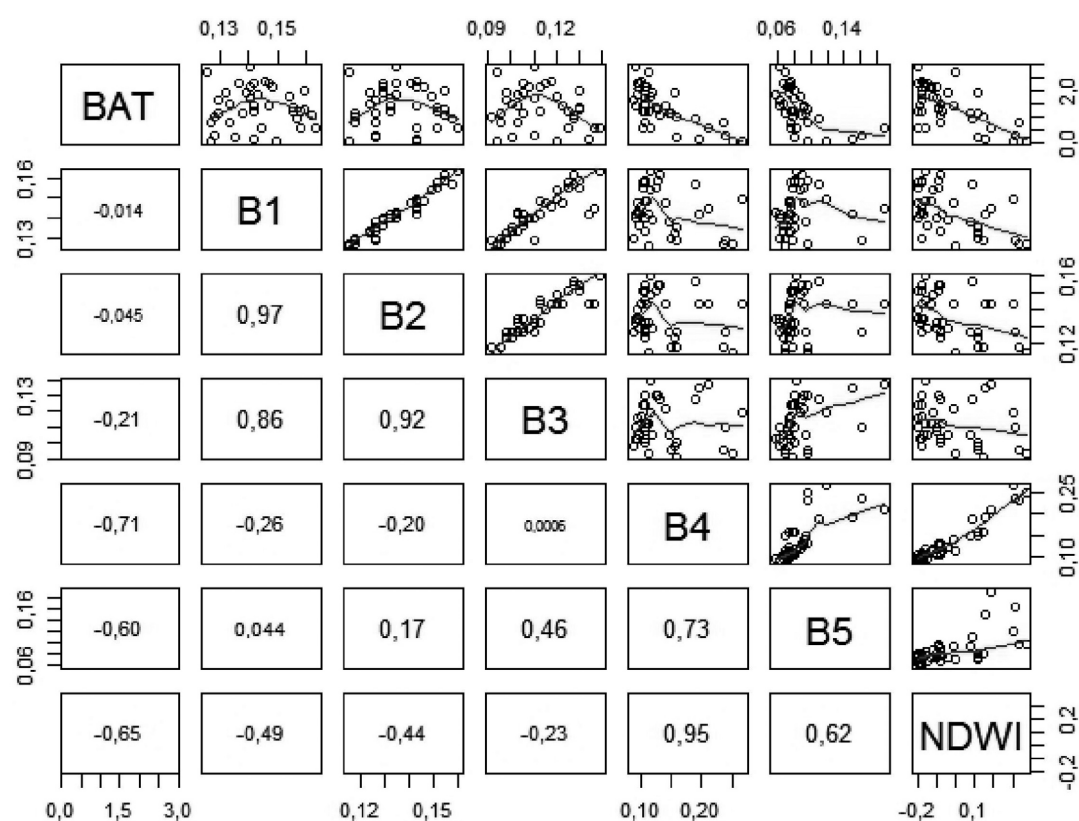


Figura 2 Gráficos de dispersão (diagonal superior) e valores de coeficiente de correlação (diagonal inferior) entre os valores de batimetria, e (A) as bandas espectrais do satélite landsat 05 (B1, B2, B3, B4 e B5) e o índice Índice de Diferença Normalizada da Água (NDWI).

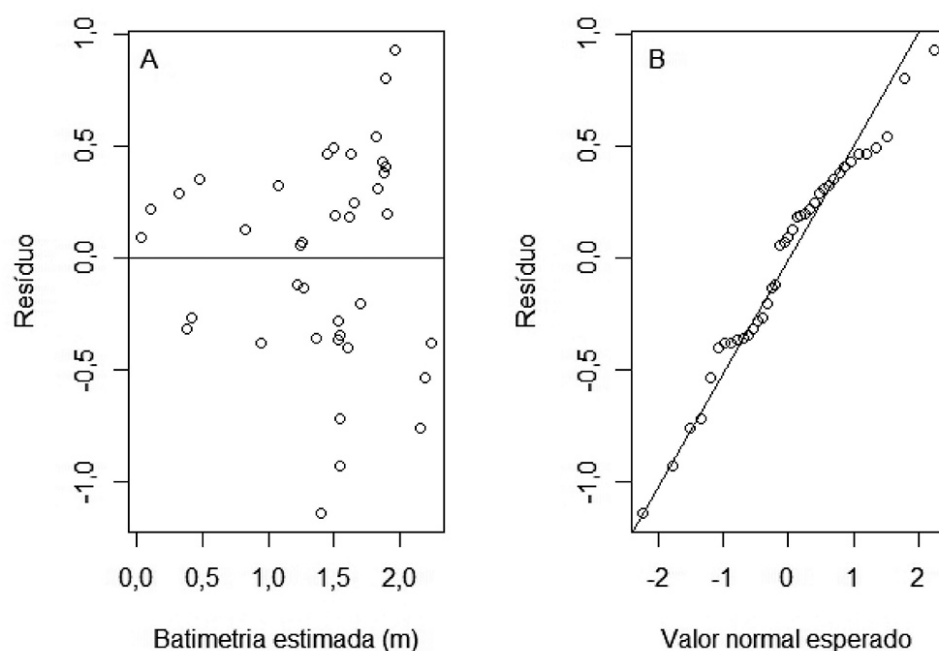


Figura 3 A. Gráfico de resíduo (padrão dos erros) para batimetria estimada; B. Gráfico de resíduo para validação do modelo.

Estimativa de Profundidade do Estuário do Rio Poxim – SE com Dados do Sensor TM Landsat 05

Cassio Filipe Vieira Martins; Darlan Teles da Silva; André Quintão de Almeida;
Maria Isidória Silva Gonzaga; Rodolfo Souza & Jorge Antônio Vieira Gonçalves

A Figura 4 apresenta o mapa de batimetria para todo o estuário do rio Poxim estimado a partir do modelo de regressão ajustado. Pode-se perceber que boa parte do estuário apresenta forte indicação de assoreamento em seu

leito, com baixos valores de profundidade. O valor máximo estimado foi de aproximadamente 2,93 m. A batimetria estimada com o modelo ajustado não obteve grandes variações de profundidade, com valor médio de 1,62 m.

Classe profundidade (m)	r^2	REQM (m)
0,07 – 0,87 (1° percentil)	0,63	0,26 (43%)
0,88 – 1,33 (2° percentil)	0,11	0,46 (35%)
1,34 – 1,95 (3° percentil)	0,63	0,49 (31%)
1,96 – 2,90 (4° percentil)	0,43	0,55 (25%)
0,07 – 2,90 (Total)	0,60	0,46 (33%)

Tabela 2 Valores do coeficiente de determinação (r^2) e a raiz do erro quadrático médio (REQM) dos valores estimados pelo melhor modelo ajustado, considerando os quatro percentis de profundidade observados no estuário do rio Poxim-SE.

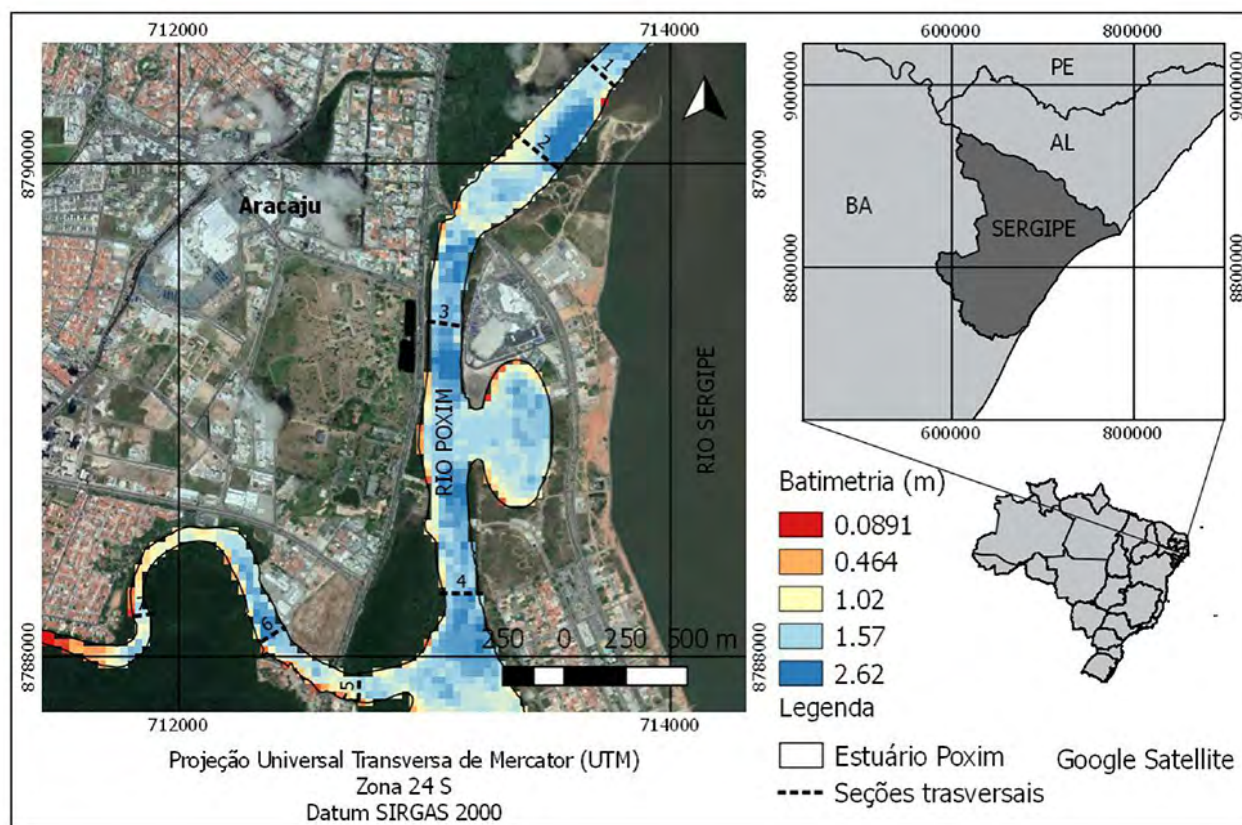


Figura 4 Batimetria estimada para o estuário do rio Poxim a partir dos modelos ajustados entre os valores medidos de batimetria e dados espectrais do satélite Landsat 5.

4 Discussão

A menor correlação (0,014) foi observada para a Banda espectral do azul (B2) e a maior (0,71) com a banda espectral no infra-vermelho próximo (B4) (Figura

2). Verifica-se que as bandas da região do visível, B1 a B3, apresentaram baixos valores de correlação com a batimetria. Apesar da faixa do comprimento de onda do azul apresentar bons resultados em modelos de estimativa de batimetria (Tripathi & Rao, 2002), este comprimento de onda nem

sempre é o que apresenta uma melhor correlação com a profundidade (Gao, 2009). Em região de estuário, os melhores modelos de estimativa de profundidade foram ajustados com a banda no comprimento de onda entre 0,77 - 0,80 μm (Kumar *et al.*, 1997). George (1997) encontrou uma forte correlação com a banda do vermelho do espectro e não com a banda do azul, resultado semelhante ao observado neste estudo.

Os melhores valores de correlação foram encontrados para as bandas 4 e 5, respectivamente, com índices de correlação igual a 0,71 e 0,60, assim como o índice da diferença normalizada da água (NDWI), com valor de 0,65. O comportamento do histograma a partir da Banda 4 (Figura 2), com os maiores valores de profundidade associados com os menores valores de refletância, é decorrente da completa absorção da radiação na região do infravermelho por parte da água, a partir de um determinado valor de profundidade. Comportamento semelhante ao encontrado por Flener *et al.* (2012), no Rio Tana, na Lapônia, ao testar diferentes modelos de estimativa batimétrica com dados de sensoriamento remoto. Em relação à Banda 4, nota-se que não ocorreu saturação dos valores refletidos a partir de uma determinada profundidade, resultados contrário do que foi observado nos estudos de Ribeiro *et al.* (2005) e Lima *et al.* (2013). Tal comportamento pode ser explicado pelo fato de que na região do estuário do Poxim a cota batimétrica máxima foi de 2,90 m. De modo geral, para a banda espectral do infra-vermelho próximo, quanto maior a profundidade do estuário, menores foram os valores de refletância. O mesmo comportamento foi encontrado por Krug & Noernberg (2006) que relacionaram o NDWI derivado de imagens do satélite Landsat 7 com valores de batimetria da região de estuário, localizado no litoral no Paraná.

Em sistemas estuarinos do estado do Paraná, Brasil, Krug & Noernberg (2005) encontraram valores de coeficiente de correlação r^2 de 0,74, a profundidades entre 0,36 – 4,5 metros, bem próximo dos valores observados no estuário do Poxim. Resultado semelhante pode ser observado em Legleiter (2014), onde foi possível estimar a batimetria com uma relação de r^2 igual a 0,6 em dois trechos nos rios Laramie e Snake, distrito de Wyoming, USA.

Ao analisar os erros da estimativa do modelo (Tabela 2), considerando as diferentes classes de profundidade (percentis), nota-se que a raiz do erro quadrático médio (REQM) reduz na medida que a profundidade do estuário do rio Poxim aumenta. Comparando com o erro relativo (%) encontrado para o modelo total (profundidade de 0,07 a 2,90 m), foi observado uma redução de 8% do erro na classe de maior profundidade (1.96 a 2.90 m), reduzindo de 33 para 25%.

Os novos estudos de estimativa de batimetria com dados de sensoriamento remoto devem avaliar o

poder de predição da banda espectral do azul costeiro (Coastal Blue). Os novos sensores da série Landsat 08 (OLI) e Sentinel 02 possuem uma banda nesta faixa de comprimento de onda. Na faixa do azul costeiro do espectro eletromagnético, teoricamente, a atenuação da radiação é menor, o que pode melhorar as estimativas de valores de batimetria, principalmente em águas claras e rasas (Miecznik e Grabowska, 2012). No entanto, cabe destacar que este comprimento de onda pode ser influenciado pelo espalhamento atmosférico (Anderson e Marchisio, 2012).

5 Conclusões

O estuário do rio Poxim-SE apresenta baixos valores batimétricos, com valor máximo de aproximadamente três metros de profundidade.

A melhor correlação entre os valores de batimetria e os dados do sensor TM do satélite Landsat 05 foi observado com a banda espectral do infra-vermelho próximo.

O emprego do Sensoriamento Remoto em estimativas batimétricas do estuário do Poxim-SE foi importante, pois, além de sua formulação permitir a interação entre dados espaciais e dados pontuais, com ela foi possível ajustar um modelo de predição da batimetria. A partir deste modelo é possível retroceder no tempo, e avaliar o comportamento batimétrico do estuário ao longo dos anos.

Por fim, a metodologia desenvolvida, neste trabalho, apresentou resultados promissores sendo proposto como mais uma ferramenta a ser explorada para subsidiar o gerenciamento do estuário do rio Poxim.

6 Agradecimentos

A Companhia de Saneamento de Sergipe (DESO) pelo fornecimento dos dados de batimetria.

7 Referências

- Anderson, N.T. & Marchisio, G.B. 2012. WorldView-2 and the evolution of the DigitalGlobe remote sensing satellite constellation: introductory paper for the special session on WorldView-2. In: *Proc.SPIE*, Vol. 8390, pp. 8390–8390–15.
- Flener, C.; Lotsari, E.; Alho, P. & Kayhko, J. 2012. Comparison of empirical and theoretical remote sensing based bathymetry models in river environments. *River Research and Applications*, 28(1): 118-133.
- Frazão, L.S. & Amaro, V.E. 2016. Caracterização batimétrica e físico-oceanográfica do porto de Cabedelo/Pb, Brasil: uma análise ambiental ao derrame de óleo. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 17(1): 125-143.
- Gao, J. 2009. Bathymetric mapping by means of remote sensing: methods, accuracy and limitations. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 33(1): 103–116.

Estimativa de Profundidade do Estuário do Rio Poxim – SE com Dados do Sensor TM Landsat 05

Cassio Filipe Vieira Martins; Darlan Teles da Silva; André Quintão de Almeida;
Maria Isidória Silva Gonzaga; Rodolfo Souza & Jorge Antônio Vieira Gonçalves

- George, D.G. 1997. Bathymetric mapping using a compact airborne spectrographic imager (CASI). *International Journal of Remote Sensing*, 18: 2067–71.
- Krug, L.A. & Noernberg, M.A. 2006. O sensoriamento remoto como ferramenta para determinação de batimetria de baixios na Baía das Laranjeiras, Paranaguá – PR. *Revista Brasileira de Geofísica*, 25(1): 101-105.
- Krug, L.A. & Noernberg, M.A. 2005. Extração de Batimetria por Sensoriamento Remoto de Áreas Rasas dos Sistemas Estuarinos do Estado do Paraná. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO - SBSR, XII, Goiânia-GO, Brasil, 2005. Anais, Goiânia, p. 3077- 3084.
- Kumar, V.K.; Palit, A. & Bhan, S.K. 1997. Bathymetric mapping in Rupnarayan–Hooghly river confluence using IRS data. *International Journal of Remote Sensing*, 18: 2269–70.
- Legleiter, C.J.; Tedesco, M.; Smith, L.C.; Behar, A.E. & Overstreet, B.T. 2014. Mapping the bathymetry of supraglacial lakes and streams on the Greenland ice sheet using field measurements and high-resolution satellite images. *The Cryosphere*, 8: 215–228.
- Lima, J.C.; Shinozaki-Mendes, R.A. & Almeida, A.Q. 2013. Estimativa da batimetria do açude do Saco-Pe com auxílio de dados orbitais. *Engenharia Agrícola*, 34(5): 1017-1023.
- Mclusky, D.S. 1989. *The estuarine ecosystem*. 2nd edition, Series Tertiary Level Biology. Glasgow to London. Blackie and Son Ltd. 215 p.
- Miecznik, G. & Grabowska, D. 2012. Worldview-2 bathymetric capabilities. In: *Proc.SPIE*, Vol. 8390, pp. 8390 – 8390 – 10.
- Namikawa, L.M. 2015. Imagens Landsat 8 para monitoramento de volume de água em reservatórios: estudo de caso nas barragens Jaguari e Jacaré do sistema Cantareira. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO - SBSR, XVII, João Pessoa-PB, Brasil, 2015. Anais, João Pessoa, p. 4828- 4835.
- ONU. 2017. Organização das Nações Unidas. Novo estudo da ONU indica que mundo terá 11 bilhões de habitantes em 2100. Disponível em: <<https://nacoesunidas.org/novo-estudo-da-onu-indica-que-mundo-tera-11-bilhoes-de-habitantes-em-2100/>>. Acessado em: 15/02/2017.
- R Development Core Team. 2014. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, Disponível em: <<http://www.R-project.org/>>.
- Ribeiro, S.R.A.; Tedesco, A.; Krueger, C.P. & Centen, J.A. 2005. Extração de profundidades mediante redes neurais artificiais e modelo de regressão usando dados de levantamento GPS e de imagem IKONOSII – estudo comparativo. *Engvista*, 7(1):73-82.
- Scott, D.B.; Tobin, R.; Williamson, M.; Medioli, F.S.; Latimer, J.S. & Boothman, W.A. 2005. Pollution monitoring in two North American estuaries: historical reconstructions using benthic foraminifera. *Journal of Foraminiferal Research*, 35(1): 65-82.
- Tripathi, N.K. & Rao, A.M. 2002. Bathymetric mapping in Kakinada Bay, India, using IRS-1D LISSIII data. *International Journal of Remote Sensing*, 23: 1013–25.
- Vermote, E.F.; Tanre, D.; Deuze, J.L.; Herman, M. & Morcette, J.J. 1997. Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 35(1): 675-686.